



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Liimaliitoksen käyttömahdollisuudet teräsrakenteissa

Juuso Torppa

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Tammikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Liimaliitoksen käyttömahdollisuudet teräsrakenteissa

Juuso Torppa

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö + 2021, 35 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Matti Kangaspuoskari

Koska yleinen tietämys liimoista on hyvin rajoittunut, tässä kandidaatintyössä on tarkoituksena tutkia liimojen käyttömahdollisuuksia teräsrakenteissa; eli millaisia ominaisuuksia liimaliitoksella on suhteessa muihin liittämismenetelmiin. Tämä on tarkoitus selvittää kirjallisuuskatsauksella suoritettavalla tarkastelulla siitä, miten liimaliitoksia hyödynnetään eri sovelluksissa ja mitä kaikkea tulisi ottaa huomioon liimaliitoksen muodostamisessa. Vaikka työssä tarkastellaan nimenomaan liimojen käyttöä teräsrakenteissa, selvitetty liimojen ominaisuudet pätevät myös monille muille materiaaleille.

Työn tuloksena havaitaan, että liimat tarjoavat tasaisen jännitys jakauman liitoksessa, mikä puolestaan johtaa parempaan väsymiskestoon muihin liittämismenetelmiin verrattuna. Lisäksi liimaliitos omaa ylivoimaiset värähtely- ja vaimennusominaisuudet, sileän ja tiiviin liitospinnan, sähköneristys- ja korroosionesto-ominaisuudet sekä kevyen, jäykän ja kustannustehokkaan rakenteen. Huonoja ominaisuuksia liimaliitoksilla ovat sen hankala purettavuus, esikäsittelyvaatimukset, testausmenetelmien puute sekä liima-aineiden herkkyys pilaantumiselle.

Liimaliitos tulisi tehdä siten, että siihen kohdistuu vain leikkaavia voimia. Lisäksi tulee huomioida toleranssit, liima-aineen hankkimiseen, säilöntään, sekoitukseen/valmistamiseen ja levitykseen liittyvät tekijät sekä komponenttien säilytys, liittäminen ja esikäsittely. Näistä tärkeimpänä viimeksi mainittu esikäsittely, jossa pinta tulisi käsitellä joko mekaanisesti tai kemiallisesti siten, että liimattava pinta-ala on mahdollisimman suuri ja pinnan kemia paras mahdollinen liima-aineen adheesion kannalta.

Teräsrakenteissa liimojen ominaisuuksia hyödynnetään esimerkiksi auto-, lento-, rakennus-, vene- ja meriteollisuudessa. Näissä sovelluksissa liimojen ominaisuuksista hyödynnetään erityisesti liimalle tyypillistä mahdollisuutta liittää erilaisia materiaaleja keskenään sekä kykyä tiivistää liitos, parantaa ääneneristystä, tärinäominaisuuksia ja rakenteen jäykkyyttä. Liimoilla korvataan monia liittämismenetelmiä paikoissa, missä muiden liittämismenetelmien ongelmat korostuvat.

Asiasanat: adheesio, liimaus, liima, liitos, teräs, teräsrakenteet

ABSTRACT

Adhesive joint in steel structures

Juuso Torppa

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis + 2021, 35 pp.

Supervisor at the university: Matti Kangaspuoskari

Due to the limited understanding of adhesives in general, the purpose of this bachelor's thesis is to examine and enlighten the application of adhesive joint in steel structures and its properties compared to other joining methods. This, on the other hand, is achieved through a literature review on utilization of adhesive joint in different applications and the factors one should consider in the forming of an adhesive joint. Even though the focus of this thesis is on the adhesive joint in steel structures, the properties of the adhesives investigated are applicable to many other materials besides steel.

It is found that adhesives provide an even stress distribution in the joint, resulting a better fatigue resistance compared to other joining methods. In addition, the adhesive joint offers superior vibration and damping properties, smooth and sealed joint surfaces, electrical insulation and corrosion protection properties. Adhesive joint is also light, rigid and cheap. Inferior properties of adhesive joint include its difficult disassembly, demanding pretreatment, lack of testing methods and degradation of the adhesive components.

The adhesive joint should be constructed in a manner, in which only shear forces are applied to it. In addition, tolerances, issues related to adhesive acquisition, preservation, mixing/preparation, and application, as well as storage, bonding and pretreatment of parts should be considered; the most important of these is the latter, pretreatment, in which the surface should be treated either mechanically or chemically to maximize the bonding surface area and ensure ideal chemical properties for adhesion.

In steel structures, the properties of adhesives are utilized in, for example, the automotive, aerospace, construction, boat, and marine industries. These applications take advantage

of the properties typical for adhesives, the ability to bond different materials together, the ability to seal the joints, improve sound insulation, vibration properties and structural rigidity. Adhesives replace other bonding methods in places where the problems of other techniques are highlighted.

Keywords: adhesion, adhesive, joint, steel, steel structures

ALKUSANAT

Työn tarkoituksena on tutkia liimojen käyttömahdollisuuksia teräsrakenteissa. Työn tekeminen ajoittui kevätlukukaudelle, vaikka aiheen pohdinta alkoikin jo joulun alla. Haluan kiittää kandityön ohjaajaa, yliopisto-opettaja Matti Kangaspuoskaria, työn ohjaamisesta sekä tarkistamisesta. Lisäksi haluaisin vielä kiittää tekniikan ylioppilas Timo Veijolaa englanninkielisen osan oikoluvusta.

Oulu, 06.04.2021

Juuso Torppa
Juuso Torppa

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT.....	
ALKUSANAT	
SISÄLLYSLUETTELO.....	
MERKINNÄT JA LYHENTEET	
1 JOHDANTO	9
2 LIIMA AINEENA	10
2.1 Tausta	10
2.2 Liima yleisesti	10
2.2.1 Liimaliitoksen hyödyt.....	10
2.2.2 Liimaliitoksen ongelmat	11
2.2.3 Liima-aineen testaaminen.....	11
2.2.4 Liima-liitoksen muoto	13
3 LIIMAT TERÄSRAKENTEISSA.....	15
3.1 Teräsrakenteiden liittämistavat	15
3.2 Liimojen oikeaoppinen käyttö.....	17
3.2.1 Teräspinnan esikäsittely.....	17
4 LIIMOJEN SOVELLUKSIA TERÄSRAKENTEISSA.....	22
4.1 Autoteollisuus	22
4.2 Lentoteollisuus	24
4.3 Rakennusteollisuus.....	25
4.3.1 Rakennusteollisuuden käyttämät liima-aineet	26
4.4 Vene- ja meriteollisuus	28
5 YHTEENVETO	33
LÄHDELUETTELO.....	34

MERKINNÄT JA LYHENTEET

BIW	<i>Body In White</i> ; autonvalmistuksen vaihe, missä kori liitetään yhteen
EB	<i>Electron Beam</i> ; elektronisuihku
MS	<i>Modified Silane</i> ; modifioitu silaani
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i> ; alkuperäinen laitevalmistaja
pH	happamuuden taso
PSA	<i>Pressure Sensitive Adhesives</i> ; paineherkät liimat
UV	ultravioletti

1 JOHDANTO

Liimojen käyttö eri rakenteissa on yleistynyt. Tämän voi havaita tarkastelemalla melkeinpä mitä tahansa arkipäivän esinettä. Siksi onkin melko kummallista, että yleinen tietämys erilaisista liimoista on edelleenkin hyvin rajoittunut ja monet mieltävät liimaamisen melko heikoksi liittämistavaksi. Liimoista myös jaetaan suhteellisen vähän tietoa opetuksessa; ne lähinnä vain mainitaan muiden liittämismenetelmien ohessa ilman minkäänlaista syvempää tarkastelua.

Tässä työssä tutkitaan liimojen käyttömahdollisuuksia teräsrakenteissa. Lähinnä siis tutkitaan, millaisia ominaisuuksia liimaliitoksella on suhteessa muihin mahdollisiin liittämismenetelmiin. Lisäksi tarkastellaan, miten liimaliitoksen ominaisuuksia hyödynnetään ja millaisiin sovelluksiin liimoja käytetään teräsrakenteissa.

Tutkimusongelma pyritään ratkaisemaan kirjallisuustutkimuksen avulla. Lisäksi työssä annetaan ohjeita liimojen oikeaoppiseen valintaan ja käyttöön.

Työ rajataan koskemaan liimojen käyttöä teräsrakenteissa, vaikka aihetta käsiteltäessä sivutaan myös muita materiaaleja. Työssä ei myöskään ole tarkoitus perehtyä liiman kemiallisiin sidoksiin tai liiman adheesioteorioihin enempää, kuin liiman käyttökohteiden tarkastelun kannalta on tarpeellista.

2 LIIMA AINEENA

2.1 Tausta

Liimaus on laajasti käytetty liittämismenetelmä teollisuudessa. Kyseisessä liittämistavassa liitettävät kappaleet yhdistetään polymeerisellä materiaalilla eli liimalla toisiinsa. Historiallisesti liimat ovat tuottaneet melko heikkoja liitoksia, mutta 1900-luvun polymeeritieteen ansiosta liimaliitosten lujuus on lähestynyt jopa itse liitettävien materiaalien lujuutta. Muutoksen myötä liimaus on korvannut yhä enemmän muita liittämismenetelmiä eri sovelluksissa. (Campbell 2011, s. 243.)

Liimat voidaan luokitella seuraaviin viiteen ryhmään: rakenneliimoihin, kuumaliimoihin, paineherkkiin liima-aineisiin eli PSA-liimoihin, vesipohjaisiin liimoihin sekä ultravioletti- eli UV-kovettuviin ja elektronisuihku- eli EB-kovettuviin liimoihin. (Campbell 2011, s. 253; 3M.)

2.2 Liima yleisesti

2.2.1 Liimaliitoksen hyödyt

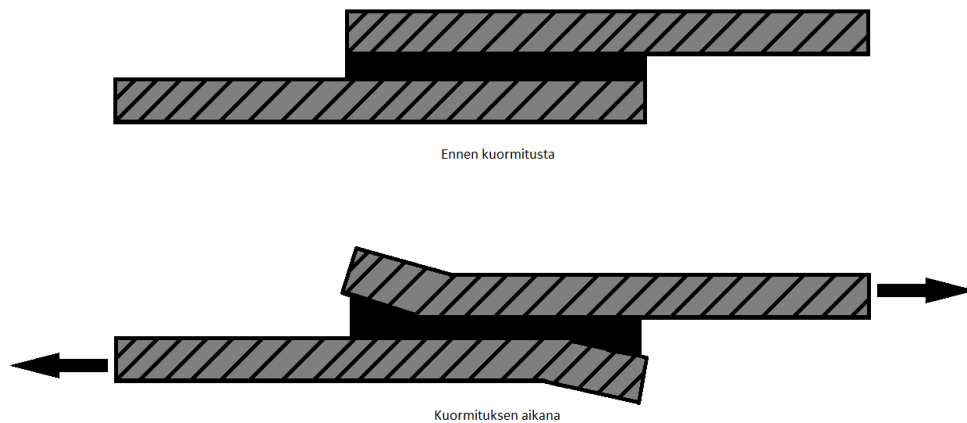
Liimaaminen tarjoaa liittämismenetelmänä tasaisemman rasituksen jakautumisen, kuin mekaaniset kiinnittimet, mikä puolestaan johtaa liitoksen väsymisenkeston paranemiseen. Lisäksi liimaliitokset ovat usein mekaanisilla kiinnittimillä tehtyjä liitoksia kevyempiä ja kustannuksiltaan halvempia. Yhtenä etuna liimaliitokset tarjoavat vielä ylivoimaisen värähtely- ja vaimennuskyvyn. Liimaliitos mahdollistaa myös sileän pinnan ja tiiviin liitoksen sekä erilaisten aineiden liittämisen keskenään. Liimatut liitokset ovat sähköä eristäviä ja estävät galvaanista korroosiota metalliliitoksissa. Liimatut liitokset toimivat jäykisteenä; ne jäykistävät rakennetta koko liitoksen alueella ja täten omaavat erinomaisen jäykkyyden. (Campbell 2011, s. 244.)

2.2.2 Liimaliitoksen ongelmat

Liimaliitos mielletään pysyväksi liitokseksi; sen purkaminen on hankalaa ja usein aiheuttaa vahinkoa sekä itse liima-aineeseen että liitosta ympäröivään rakenteeseen. Liimaus on mekaanisia kiinnitysmenetelmiä vaativampi pinnan esikäsittelyn suhteen. Esikäsittely puolestaan on äärimmäisen tärkeä, jotta saavutetaan vahva ja kestävä liitos. Liimaliitoksille ei ole vielä olemassa testausmenetelmää liima-aineen huokoisten kohtien tarkasteluun, mikä ei samalla tuhoisi liitosta. Ongelmana on myös se, että liima-aineet pilaantuvat helposti; sekoitettuna tai poistettuna valmistajan ohjeiden mukaisista säilytysolosuhteista, liimat tulee käyttää ja kovettaa annettuna aikana. Liimat ovat lisäksi alttiita pilaantumaan ympäristötekijöiden vuoksi; monet liimat imevät kosteutta ja niissä ilmenee lujuus- ja kestävyysominaisuuksien heikentymistä kohonneissa lämpötiloissa. Joidenkin liimojen pilaantuminen voi johtua myös kemikaalien vaikutuksesta. Kaiken tämän vuoksi onkin tärkeää, että liima-aineet säilytetään valmistajan ohjeiden mukaisesti. (Campbell 2011, s. 245.)

2.2.3 Liima-aineen testaaminen

Liimaliitoksen lujuus mitataan usein yksileikkeisen limiliitoksen testillä, jossa liimattuja pintoja vedetään erilleen toisistaan kuvan 1 mukaisesti. Limiliitoksen leikkauslujuus vedossa ilmoitetaan liiman murtumisjännityksenä, joka lasketaan jakamalla murtumisen aiheuttava kuormitus liitoksen pinta-alalla. Esitetyn kaltainen testi on suhteellisen helppo toteuttaa, mutta koska jännitys jakauma ei ole liima-aineessa tasainen vaan se saavuttaa huippunsa liitoksen reunoissa, ilmoitettu leikkauslujuus on pienempi kuin liiman todellinen lujuus. Todellista leikkauslujuuden arvoa ei testissä saada liimattavien osien taipumisen ja kuoriutumista aiheuttavien voimien vuoksi. (Campbell 2011, s. 250–251.)



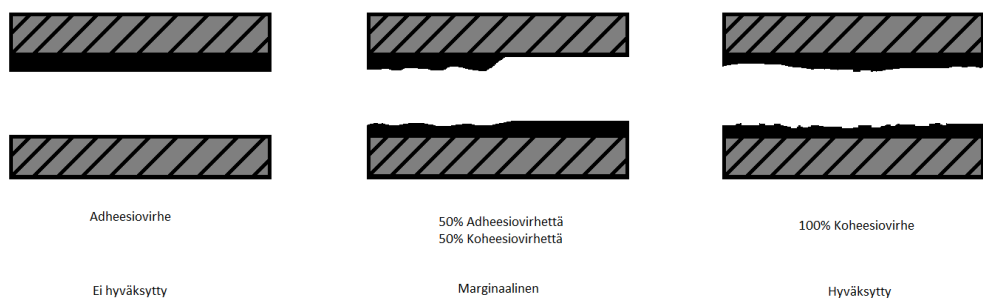
Kuva 1. Tyypillinen testikappale leikkauslujuuden testaamiseksi (mukaillen Campbell 2011, s. 251).

Sen lisäksi, että liima-aineesta ei saada selville tarkkaa leikkauslujuutta, vielä ei myöskään ole olemassa menetelmää, jolla voitaisiin mitata leikkausvenymää. Jos saataisiin selvitettyä leikkausvenymä, voitaisiin tämän perusteella laskea liima-aineen leikkausmoduuli, joka puolestaan on erittäin tarpeellinen rakenneanalyysissä. Kaikesta epätarkkuudesta huolimatta, liima-aineen leikkausjännityksen ja leikkausvenymän ominaisuuksia voidaan verrata keskenään siten, että asetetaan liimattavat osat niin paksuiksi, että taivutusvoimat muuttuvat mitättömiksi. (Campbell 2011, s. 251.)

Liima-aineita testattaessa sekä luonnehtiessa, tulee Campbell (2011, s. 251) mukaan huomioida useita asioita:

1. Kaikkien testiolosuhteiden tulee olla huolellisesti kontrolloituja: pinnan esikäsittely, liima-aineen käsittely sekä itse liimausprosessi.
2. Testin täytyy kohdistua juuri samanlaiseen liitokseen, jota on tarkoitus myös käyttää itse varsinaisessa valmistuksessa.
3. Täytyy suorittaa käytönaikaisten olosuhteiden perusteellinen arviointi; tämä sisältää lämpötilan, kosteuden ja kaikkien mahdollisten liuottimien vaikutuksen, mille liitos voi altistua käyttöikänsä aikana.

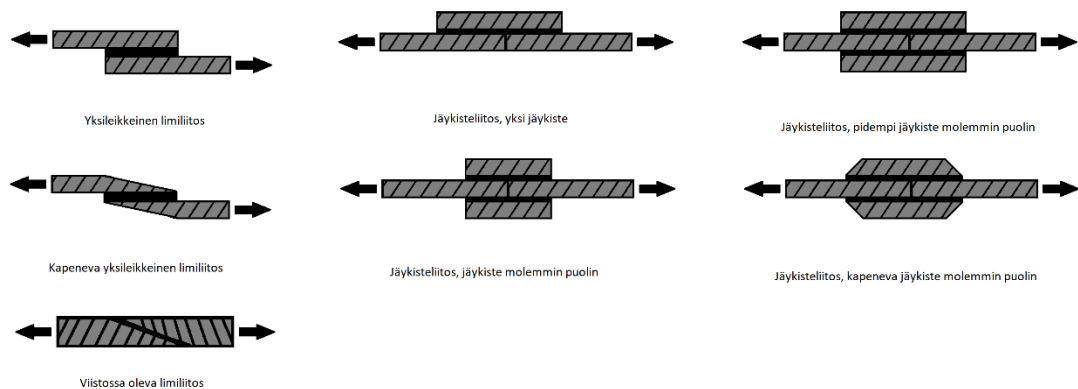
Kaikkien koekappaleiden vikaantumistilat tulee tutkia. Mikäli näytteessä esiintyy esimerkiksi kuvan 2 mukainen liitoksen kestävyys heikentymiseen johtava liimavirhe liimattavan osan ja liima-aineen rajapinnalla, eikä niinkään koheesion puutteesta johtuvaa murtumaa liima-aineessa, ongelman syynä saattaa olla pinnan esikäsitteleminen. (Campbell 2011, s. 250–251.)



Kuva 2. Ero koheesion ja adheesion vaikutuksesta virhetilassa (mukaillen Campbell 2011, s. 251).

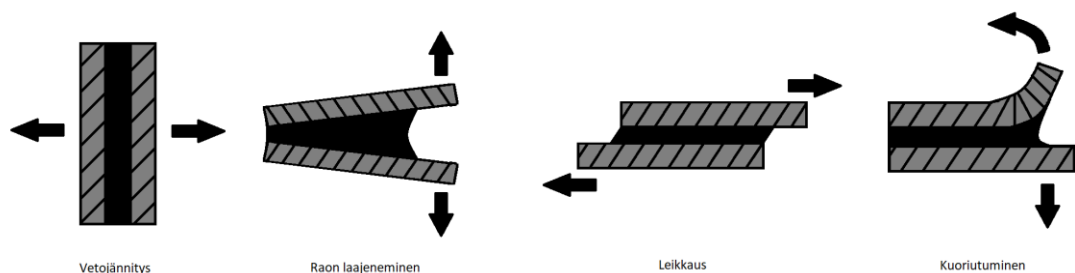
2.2.4 Liima-liitoksen muoto

Liimaamisessa tarkoituksena on saada siirrettyä toisen liimattavan komponentin kuormitus toiseen komponenttiin liimakerroksen välityksellä. Kyky siirtää kuormitusta riippuu liitoksen muodosta, liima-aineen ominaisuuksista sekä liimattavista pinnoista. Jotta kuormitukset siirtyisivät tehokkaasti liiman välityksellä, tulee pintojen olla päällekkäin, siten että liima-aine on kuormittunut leikkaavilla voimilla, kuten kuvassa 3. (Campbell 2011, s. 248.)



Kuva 3. Tyypillisiä liimaliitoksia, missä liima-aine on kuormittunut leikkaavilla voimilla (mukaillen Campbell 2011, s. 249).

Kuten jo kappaleessa 2.2.3 mainittiin; tyypillisessä liitoksessa, leikkausjännitys saavuttaa huippuarvonsa liitoksen reunoilla, kun taas liitoksen keskiosa kantaa paljon pienemmän osuuden kuormasta. Tästä syystä suurille kuormituksille altistuvien liima-aineiden tulee olla lujia ja kestäviä, erityisesti silloin kun liitoksessa ilmenee taivutuskuormia, jotka puolestaan aiheuttavat kuvan 4 mukaista kuoriutumista. Murtolujuuden ja väsymisiän parantamiseksi, hauraita epoksiliimoja parannellaan lisäämällä liima-aineen joukkoon kumia tai muita elastomeerejä. (Campbell 2011, s. 248.)



Kuva 4. Neljä yleistä liimaliitoksen kuormitustapausta, joista rakoilua ja kuoriutumista tulisi välttää (mukaillen Campbell 2011, s. 250).

3 LIIMAT TERÄSRAKENTEISSA

3.1 Teräsrakenteiden liittämistavat

Taulukossa 1 esitetään tavallisimpia metallien liittämistapoja, joita käytetään teräsrakenteissa. Taulukossa on kuvattu liittämistapojen yleisiä ominaisuuksia, ja niitä on lisäksi helppo vertailla taulukossa ensimmäisenä esiintyvään liimaamiseen.

Taulukko 1. Metallien liittämistavat (mukaillen Dunn 2010, s. 100).

	Liimaliitos	Mekaaniset kiinnittimet	Juotos
Liitoksen jännitys jakauma	Tasainen jakauma	Jännityskeskittymä kiinnittimissä	Melko tasainen jakauma
Väsymisen kesto	Erinomainen	Tärinän aiheuttama löystyminen estettävä	Hyvä
Kyky liittää eri metallien kesken?	Erinomainen useimmissa yhdistelmissä	Yleensä hyvä; tosin joitain ongelmia pehmeillä metalleilla	Jonkinasteinen
Liitoksen esikäsittely	Puhdistus ja esikäsittely usein tarpeellinen	Vaatii reiän poraamisen tai kierteiden teon	Esijuoksute tarpeellinen
Lämmönkesto	Rajattu	Erittäin korkea	Käytettyjen metallien pehmentymiseen asti
Liitoksen ulkonäkö	Näkymättömät liitossaumat	Pinnan epäjatkuvuudet usein havaittavissa	Yleensä hyväksyttävä
Valmistusnopeus	Hidas tai nopea riippuen liima-aineesta	Hidas tai keskitaso	Voi olla todella nopea
Materiaalikulut	Pienet	Korkeat	Keskitasoa

Operointikulut	Pienet	Keskitasoa	Keskitasoa
Pääomakulut	Pienet	Pienet	Pienet

	Kaarihitsi	Pistehitsi	Niittiliitos
Liitoksen jännitys jakauma	Melko tasainen jakauma	Jännityskeskittymiä rakenteessa	Jännityskeskittymiä rakenteessa
Väsymisen kesto	Usein vaaditaan erikoismenetelmiä keston parantamiseksi	Usein heikko	Hyvä
Kyky liittää eri metallien kesken?	Rajattu	Rajattu	Erinomainen
Liitoksen esikäsittely	Vähäinen tai ei mitään	Vähäinen tai ei mitään	Reikien teko, jos ei käytetä lävistäviä niittejä
Lämmönkesto	Erittäin korkea	Erittäin korkea	Erittäin korkea
Liitoksen ulkonäkö	Yleensä hyväksyttävä	Pinnan epäjatkuvuudet usein havaittavissa	Pinnan epäjatkuvuudet usein havaittavissa
Valmistusnopeus	Voi olla todella nopea	Voi olla todella nopea	Voi olla todella nopea
Materiaalikulut	Pienet	Pienet	Korkeat
Operointikulut	Korkeat	Keskitasoa	Keskitasoa
Pääomakulut	Korkeat	Korkeat	Pienet

Näiden taulukossa 1 esitettyjen metallien liittämistapojen lisäksi on myös muita liittämistapoja kuten mekaaninen puristusliitos, jossa kaksi päällekkäin olevaa metallilevyä liitetään yhteen kuppimaiseksi rakenteeksi syvävetämällä, muotin ja lyömätyökalun avulla. Joskus tällaista liittämistapaa käytetään yhdessä liimaamisen kanssa. Myös esim. autoteollisuudessa, alkuperäisen laitevalmistajan eli OEM tasolla sekä korinkorjauksessa, liimaamista yhdistetään toiseen liittämismenetelmään,

pistehitsaukseen. Tämä toimii siten että hitsaus tapahtuu kovettuneen/kovettumattoman liiman läpi taikka lisäämällä liima hitsattuun liitoskohtaan jälkikäteen. Tällaisessa sovelluksessa liimaan usein lisätään myös metallijauhetta, mikä tekee liitoksesta sähkönjohtavan. Edellä mainittujen liittämistapojen lisäksi liimaamista yhdistellään myös niittiliitokseen, minkä seurauksena saadaan aikaiseksi vahvempi ja vähemmän niittejä sisältävä liitos, kuin pelkästään niittejä käyttämällä. (Dunn 2010, s. 99–101.)

3.2 Liimojen oikeaoppinen käyttö

Terässeoksia käytetään usein kohteissa, joissa on korkea lämpötila ja joissa rakenteen oletetaan täyttävän tiettyjä jäykkyyksivaatimuksia. Tämän seurauksena ongelmat, kuten korroosio sekä liimojen että esikäsitteilyaineiden lämpöhajoaminen ja kosteusvaikutukset on tärkeä huomata. (Ebnesajjad S. & Ebnesajjad C. 2014, s. 163.)

Liimaamisen yleiset vaiheet voidaan esittää Campbell (2011, s. 264–265) mukaan seuraavasti:

1. Liima-aineen hankkiminen sekä säilöntä.
2. Liimattavien osien kerääminen ja niiden säilyttäminen yhdessä.
3. Toleranssien sopivuuden varmistaminen liimaliitokseen.
4. Osien esikäsitteily hyvän liimaantuvuuden saavuttamiseksi.
5. Liima-aineen sekoitus ja/tai valmistus.
6. Liiman levitys.
7. Osien ja liima-aineen yhdistäminen kokoonpanon muodostamiseksi.
8. Voiman käyttäminen liitoksessa hyvän istuvuuden takaamiseksi.
9. Voiman käyttäminen liima-aineen kovettamistarkoitukseen tai kiinnittämiseen, tuoden tarvittaessa lämpöä liima-aineeseen kemiallisen reaktion edistämiseksi.
10. Liitetyn kokoonpanon tarkastelu.

3.2.1 Teräspinnan esikäsitteily

Edellä mainituista vaihteista neljäs, *Osien esikäsitteily hyvän liimaantuvuuden saavuttamiseksi*, on yksi tärkeimmistä tekijöistä riittävän lujuuden ja kestävyiden

takaamiseksi korkean suorituskyvyn kohteissa (Ebnesajjad S. & Ebnesajjad C. 2014, s. 163). Koska liitoksissa jännitysten tulee siirtyä liimattavasta pinnasta toiseen liima-aineen kautta, liima-aineen ja liimattavan pinnan rajapinta puolestaan muodostuu jännitysten siirtymisessä kriittiseksi tekijäksi (Pocius & Dillard 2002, s. 947). Pinnan esikäsittely on määritelty täten tarkoittamaan liimattavaan alaan kohdistuvaa, yhtä tai useampaa, operaatiota: puhdistaminen, irtomateriaalin poistaminen sekä pinnan fyysinen ja/tai kemiallinen muokkaus. Pinnan esikäsittely on liitoksen kannalta kriittisempi tekijä nimenomaa terästen liimaamisessa verrattuna moniin muihin metalleihin. Terästä liimattaessa tarttuvuus voi vaikuttaa hyvältä, mutta liima-aineen sidokset katkeavat nopeasti altistuessaan koviin ympäristöoloihin; tästä syystä esikäsittelyaineiden käyttö on suotavaa. (Ebnesajjad S. & Ebnesajjad C. 2014, s. 163.)

Pinnan esikäsittelyllä pyritään luomaan luja ja vakaa rajapinta, joka on ominaisuuksiltaan itse käytettävää liima-ainetta lujempi ja kestävämpi. Tällöin liitoksen käyttöiän aikana tapahtuva mahdollinen murtuminen tapahtuu liima-aineen koheesion pettämisen johdosta. (Pocius & Dillard 2002, s. 947.)

Parhaan mahdollisen liimaliitoksen saavuttamiseksi vaaditaan Campbell (2010, s. 235) sekä Pocius ja Dillard (2002, s. 947–948) mukaan erilaisia esikäsittelytoimintoja:

- Liimattavien pintojen täytyy olla puhtaita; pinta tulee puhdistaa kaikista mahdollisista saasteista tai irtonaisesta materiaalista, jotka voisivat häiritä liimaliitoksen muodostumista.
- yhteen liimattavan alan tulee olla mahdollisimman suuri; tämä saavutetaan karhentamalla liimattavaa pintaa mekaanisesti,
- liima- tai esikäsittelyaineen tulee kastella liimattava pinta täysin.
- liimattavan pinnan kemiallisen koostumuksen tulee olla sellainen, että liima-aine tarttuu pintaan; pinnan esikäsittelyn tulee sallia sekä edistää sidosten muodostuminen liimattavan pinnan/esikäsittelyaineen ja liima-aineen rajapinnan yli. Tämän rajapinnan tulee olla vakaa liitokselle arvioituissa käyttöolosuhteissa koko liitoksen käyttöiän ajan.
- Pinnankäsittelymenetelmä tulee olla toistettavissa; toistettavuus edellyttää, että käsitellyn pinnan tulee olla vapaa saasteista, karstasta sekä muista

samankaltaisista pinnanmuodostumista. Toistettavuus helpottuu, mikäli käsittelyn prosessimuuttujat kuten pH-arvo, liuoksen saastuminen, liuoksen kemia, lämpötila ja aika ovat muunneltavissa. Toistettavuutta parantaa myös, mikäli prosessi on riippumaton käytettävästä metalliseoksesta tai kuumennuksesta.

Useilla teräseoksilla pintarakenteeseen on taipumus muodostua hyvin nopeasti oksideja, minkä vuoksi kuivumisprosessit puhdistuksen jälkeen muodostuvat kriittisiksi. Alkoholihuuhtelut vesihuuhtelun jälkeen nopeuttavat kuivumista ja täten vähentävät pintakerrosten epätoivottua muutosta. Hiiliteräs ei välttämättä vaadi sen suurempia käsittelyitä, kuin rasvanpoistoa ja pinnan karhentamista erinomaisen liimaantuvuuden saavuttamiseksi. Käytännössä tarvittavan esikäsittelyn selvittämiseksi olisi hyvä tehdä testejä itse käytettävällä liima-aineella. Metallipintojen esikäsittelyä liimaamista varten koskeva standardi ASTM D2651-01 esittää hiiliteräkselle sekä ruostumattomalle teräkselle erilaisia mekaanisia ja kemiallisia menetelmiä liimattavien pintojen esikäsittelyyn. (Ebnesajjad S. & Ebnesajjad C. 2014, s. 163,165.)

Hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen esikäsittelyyn voidaan käyttää samoja mekaanisia menetelmiä: harjaus teräsvillalla tai -harjalla, hiekkapuhallus sekä raepuhallus muulla aineella kuten lasikuulilla tai vaikkapa metallijauheella; rae- ja hiekkapuhalluksessa voidaan mahdollisesti käyttää lisänä paineistettua vettä tai höyryä. Mekaanisissa esikäsittelymenetelmissä on tärkeää huomioida, että hioutumista aiheuttavat materiaalit, kuten rae- ja hiekkapuhalluksessa käytettävä puhallusmateriaali, kangas, hiekkapaperi tai harjat, eivät sisällä saasteita, jotka saattaisivat levitä ja hangata teräksen pintaa epäsuotuisalla tavalla. Lisäksi ilman vesilisää tapahtuvalla puhalluksella on taipumus vääntää ohutlevyjä, mistä syystä tällainen menetelmä soveltuukin vain paksuille osille. Mekaanisista menetelmistä rae- tai hiekkapuhallus vesi-/höyrylisällä sekä hioma-aineella on tehokkain, eikä oikein käytettynä väännä käsiteltäviä osia toisin kuin ilman vesi-/höyrylisää. Mikä tahansa mekaanisista menetelmistä saattaa kuitenkin epäjalioilla metalleilla aiheuttaa pinnan työstölujittumista; käsihionta sekä harjaus metallivillalla tai teräsharjalla ovat kuitenkin menetelmiä, jotka aiheuttavat työstölujittumista vähiten. Kaikkien mekaanisten menetelmien käytössä tulee pyrkiä estämään syvien urien taikka karkeiden pintojen muodostumista, jotka eivät edistä hyvää liitettävyyttä. Pinnat tulisi pestä, puhdistaa höyryllä sekä harjata tai puhaltaa kuivalla

öljyttömällä ilmalla kaikkien hioma-ainejäämien poistamiseksi. (Ebnesajjad S. & Ebnesajjad C. 2014, ASTM D2651-01, s. 165,168.)

Teräksen kemialliseen esikäsittelyyn standardi puolestaan suosittelee pääosin typpi- ja fosforihaposta koostuvan liuoksen käyttöä. Upottamalla käsiteltävä osa liuokseen, saadaan aikaiseksi tahraton pinta, jota voidaan käsitellä jälleen muilla kemiallisilla prosesseilla. Kemiallisessa esikäsittelyssä liuoksen lämpötilalle ja liuokseen upottamisajalle on useita eri variaatioita. (Ebnesajjad S. & Ebnesajjad C. 2014, ASTM D2651-01, s. 165, 168–170.)

Ohuet osat ja levymateriaalit voidaan käsitellä käyttäen ruostumattomalle teräkselle tarkoitettuja esikäsittelymenetelmiä. Suurimmaksi ongelmaksi tässä muodostuu pintojen hapettumisen estäminen; hapettuminen voi tapahtua hyvinkin lyhyessä ajassa, jopa ennen osien kuivumista. Liima- tai esikäsittelyaine täytyykin tämän vuoksi levittää heti kuivumisen jälkeen ja osat on liitettävä yhteen välittömästi. (Ebnesajjad S. & Ebnesajjad C. 2014, ASTM D2651-01, s. 165.)

Monilla teollisuudenaloilla pinnankäsittelylle annetaan erilaista painoarvoa: Ilmailu- ja avaruusteollisuudessa, missä tuotantomäärät ovat suhteellisen pieniä ja painotetaan turvallisuutta, pinta käsitellään valmistuksen tai korjauksen aikana huolellisesti ennen liimaamista; näin taataan paras liitoslujuus ja liitoksen kestävyys. Autoteollisuudessa, missä tuotantomäärät ovat suuria, ei käsitellä pintaa juuri lainkaan ja tästä syystä siellä usein käytetäänkin saasteita sietäviä liimoja. Autoteollisuuden ohella myös suuria tuotantomääriä ja pieniä vaatimuksia jännityksen ja kestävyuden suhteen omaava pakkausteollisuus minimoi pinnankäsittelyn. (Pocius & Dillard 2002, s. 947–948.)

Teräsrakenteiden liimaliitosten tutkimuksista sekä niihin kohdistuvasta kaupallisesta mielenkiinnosta huolimatta, teräskohteisiin soveltuvia yleiskäyttöisiä esikäsittelymenetelmiä ei ole vielä saatu kehitettyä. Raudassa ei muodostu yhtenäistä oksidikerrosta mikä aiheuttaa, että liimattavalle pinnalle on vaikea muodostaa liimaamisen kannalta hyvän mikrorakenteen omaavaa vakaata kalvoa. Tämän seurauksena raepuhalluksesta on tullut oletusarvoinen esikäsittelyprosessi huolimatta siihen kohdistuvista useista varjopuolista. Kyseisiin varjopuoliin kuuluu muun muassa se,

että raepuhallusaine itsessään pitää sisällään epäpuhtauksia, jotka saattavat altistaa pinnan muodonmuutoksille, mikä puolestaan voi johtaa huonompaan lopputulokseen käsittelyllä saavutetuista karkean pinnan eduista huolimatta. Toinen haittapuoli on, että ruostumattomia teräksiä lukuun ottamatta rae- tai hiekkapuhaltamalla saadulla pinnalla on taipumus ruostumiseen ja korroosioon, mikäli sitä ei välittömästi suojata korroosionestoaineella. Silloinkin, koska korroosionestoaineet eivät aina ole 100 % tehokkaita, kosteuden saavuttaessa liitoksen pinnan ennen tai jälkeen liittämisen, muodostuu epäkoherentti rajapinta, joka johtaa liitoksen sidoslujouden heikkenemiseen. (Pocius & Dillard 2002, s. 963.)

Ruostumattoman teräksen tapauksessa, ongelma on hieman erilainen: oksidit voivat olla melko stabiileja, mutta ne ovat erittäin ohuita ja todella sileitä ilman minkäänlaista mikrorakeisuutta, joka johtaisi erinomaiseen sidoslujuteen ja -kestävyyteen. Raerajoihin tai mikrorakenteeseen kohdistuva etsaus eli happokäsittely, jonka tarkoituksena on saada aikaan mikrorakeisuutta, voi toimia mutta jokainen seos ja jokainen lämpökäsittely vaatii erilaisia etsausaineita ja prosessinkulkua tehotakseen; tällainen menettely lisäisi kuitenkin välittömästi pinnan käsittelykustannuksia. Monissa sovelluksissa, teräслиitoksen lujuusvaatimukset eivät ole yhtä vaativia kuin vaikkapa alumiinille ja titaanille, minkä johdosta sidosominaisuuksien osalta voidaan tehdä joitain uhrauksia. Lisäksi on havaittu, että tietyt suurissa lämpötiloissa kovettuvat epoksiliimat voivat muodostaa kestäviä sidoksia suoraan öljyisille teräspinnoille. Kyseinen mekanismi vaatii toimiakseen öljyn termodynaamisen siirtymän pois teräspinnalta sekä öljyn imeytymisen liima-aineeseen. Näiden kahden mekanismin toimintaan vaikuttaa öljyn polaarisuus sekä liima-aineen pinta-ala-/tilavuussuhde, johon voidaan vaikuttaa liimattavan pinnan karheudella. Esitetyn kaltainen mekanismi on onnekas, sillä monet teräksen liimaussovellukset, erityisesti auto- ja laitteollisuudessa, omaavat suuret valmistusmäärät ja siten niiden yksityiskohtainen pinnan esikäsittely ei ole toivottavaa tai se voi olla jopa täysin mahdotonta. (Pocius & Dillard 2002, s. 963–964, 984.)

4 LIIMOJEN SOVELLUKSIA TERÄSRAKENTEISSA

4.1 Autoteollisuus

Liimaustekniikkaa on jo useita vuosia käytetty autoteollisuudessa kustannustehokkaasti autojen viimeistelyssä kuten esimerkiksi mattojen ja peilien sekä auton ovien sisäpuoliin, konepeltiin ja muualle kiinnitettävien jäykisteiden liittämiseen. Nyt huomio on kohdistunut yhä enemmän myös kuormia kantaviin liitoksiin. Liimaus on erityisen sopiva liittämismenetelmä ohutpinnoitettujen terästen kiinnittämiseen ja sitä voi käyttää myös yhdessä muiden liittämistapojen kuten mekaanisten kiinnittimien tai hitsaamisen kanssa. (Davies 2012, s. 260.)

Autoteollisuus hyödyntää Davies (2012, s. 260) mukaan seuraavia liimauksen ominaisuuksia:

- Kyky liittää erilaisia materiaaleja keskenään.
- Tasainen jännitysten jakautuminen liitoksessa, mikä lisää rakenteen jäykkyyttä.
- Parempi NVH, *Noise, Vibration, Harshness*, eli hyvä ääneneristys, pieni tärinä ja sileä pinta.
- Liiman kyky tiivistää liitos.

Liimoja on tyypillisesti luokiteltu sen mukaan, miten niiden muuttuminen nestemäisestä kiinteäksi tapahtuu. Liimoja, joilla muutos tapahtuu fysikaalisesti, kutsutaan kuumaliimoiksi. Liimat, joilla muodonmuutos on puolestaan kemiallisesti tapahtuva, pitävät sisällään UV- ja EB-kovettuvat liimat. Kaksi autoteollisuudessa käytettyä liimatyyppiä ovat kertamuovipohjaiset eli *thermoset* sekä kestopuovit eli *thermoplastic*, jotka tarjoavat erilaisia ominaisuuksia. Kertamuovipohjaiset liimat omaavat suuren leikkauslujuuden, jäykkyyden sekä kestävyuden. Ne kovetetaan joko kuumentamalla yksi-komponenttiliimojen tapauksessa tai kovikeaineella kaksi-komponenttiliimojen tapauksessa. Kestomuovit puolestaan sopivat erityisesti kohteisiin, missä iskukuormituksesta aiheutuvan energian absorptio on todennäköistä. Kestomuovit ovat sitkeitä, lujia sekä ne suoriutuvat hyvin matalissa lämpötiloissa. (Davies 2012, s. 260.)

Yleisesti ottaen taulukossa 2 esiintyvät PVC ja typpifenolivalmisteet, joita ennen käytettiin helmalaippojen tiivistämiseen, on nykyään korvattu kumipohjaisilla liimoilla ja epokseilla. Aikaisemmin käytetyt liimat eivät sallineet kovinkaan paljon väärinkäytöksiä eivätkä suosituksia ylittäviä lämpötiloja. (Davies 2012, s. 261.)

Taulukko 2. Yleiset autonkorissa käytettävät liimat (mukaillen Davies 2012, s. 261).

Tyyppi	Edut	Haitat
PVC	Halpa, helppokäyttöinen	Ylikuumennus voi aiheuttaa korroosiota aiheuttavia sivutuotetta
Typpifenoli	Halpa, helppokäyttöinen	Saattaa säilöä kosteutta
Kumipohjainen	Hyvä tärinänvaimennuskyky	Eivät täytä korkeampia lujuusvaatimuksia
Epoksi	Täyttävät korkeammat lujuusvaatimukset	Terveys- ja turvallisuusvaara; käyttö vaatii huolellisuutta

Liimojen asennus autoteollisuudessa voidaan tehdä myös manuaalisesti, mutta automaation käyttö on lisääntynyt. Käytännössä liiman annosteluun käytettävän laitteen koko vaihtelee pienestä käsikäyttöisestä mallista aina suuriin robottijärjestelmiin. Asennuksen monipuolisuus mahdollistaa liimauksen soveltamisen myös korjaamiseen jälkimarkkinoilla. Yksikomponenttiliimat ovat helpoimpia annostella, sillä niissä tarvitsee huomioida vain liiman virtaus sekä pumppauslaitteen ohjaus. Kaksikomponenttiliimat, joilla fyysinen kovettaminen vaatii liimakomponenttien sekoittamisen, tarvitsevat puolestaan pumppaustoiminnon, virtausmittarin, sekoittajan sekä muita vastaavia toimintoja omaavan lisälaitteen. Vaikka liiman levittäminen voidaan helposti automatisoida, kestävän liitoksen aikaansaamiseksi vaaditaan suurta pinta-alaa. Alhainen käsittelylujuus sekä kuorinnan- ja iskunkesto voidaan sivuuttaa käyttämällä liitoksessa niittejä. Erityisiä iskunkestäviä liimoja on kehitetty törmäysalttiille osille;

liitoksessa syntyneet mikroskooppiset halkeamat sulkeutuvat ja murtovenymä kasvaa. (Davies 2012, s. 261,263.)

Liimaliitoksen edut on havaittu esimerkiksi DaimlerChrysler S-sarjan Coupe:ssa: liimaamiselle saadaan jaettua voima laajalle alueelle, liimaliitos on sähköä eristävää ja sen saumat eivät vaadi erillistä korroosionestoa. Lisäksi vielä liimaliitokset vastustavat enemmän äkillisiä materiaaliuutoksia törmäystilanteessa säilyttäen kantavan rakenteensa ja deformatiivisen tarkasti mallinnetulla tavalla, toisin kuin pelkät pistehitsatut liitokset. On siis totta, kun on väitetty, että liimaamisessa on monia etuja BIW-rakentamisessa eli autonrakentamisen vaiheessa, missä kori liitetään yhteen. Liimaliitoksen avulla pystytään lisäämään rakenteen jäykkyyttä 15–30 % pistehitsattuihin osiin verrattuna. On myös todettu, että suurille kuormituksille altistuvissa liitoksissa havaitaan pienempää lujuuden heikentymistä käyttöänsä aikana, verrattuna hitsattuihin liitoksiin. (Davies 2012, s. 262–263.)

4.2 Lentoteollisuus

Siviilikäyttöisten lentoalusten liitoksissa alumiini on käytetyin metalli. Suurilta osin tämä johtuu siitä, että alumiini on hallitseva materiaali kuljetusalusten rakenteessa. Terästä ja titaania taas käytetään paikoissa, missä vaaditaan suurta lujuutta ja korkeiden lämpötilojen kestoja ja joihin alumiini ei tämän vuoksi sovellu. Tällaisia kohteita lentokoneissa ovat esimerkiksi laskutelineet, moottori ja sen tuennat, siipien ohjauskiskot, vaunut sekä toimilaitteet. Suurin osa edellä mainituista, elleivät kaikki, pitävät sisällään rajoitteita lämpötilalle tai kokoonpanolle, minkä johdosta liimaus on aiemmin ollut teknisesti vaikeaa tai vain vähän hyödyllistä. Syynä on ollut menestyksen puute kustannustehokkaiden, robustien ja kestävien pinnankäsittelymenetelmien kehittämisessä titaaniin ja teräksen kaltaisille metalleille. Viime vuosikymmeninä kehitystä on kuitenkin tapahtunut korkeita lämpötiloja sietävissä komposiitti- ja liimamateriaaleissa sekä titaani- ja teräspintojen käsittelyprosesseissa. Tällainen edistys on mahdollistanut liimaliitosten käytön uusilla alueilla, erityisesti moottoreissa. Koska moottoreissa pyritään lisäämään tehokkuutta ja voimaa, moottorinvalmistajat ovat melko aggressiivisesti hyödyntäneet liimaliitoksia uusissa käyttökohteissa. (Pocius & Dillard 2002, s. 1156.)

4.3 Rakennusteollisuus

Terästä ja alumiinia käytetään rakennusteollisuudessa useissa eri käyttökohteissa. Kuitenkin liimaliitosten käyttö näissä rakenteissa on melko harvinaista. Yleisiä käyttökohteita teräksen liimaamiselle on esimerkiksi elementtirakentamisessa katoissa ja seinissä käytettävät sandwichelementit. Niissä alumiininen tai teräksinen ohutlevypinta on kiinnitetty, fyysisiltä mitoiltaan paksumpaan vaahto- tai mineraalivillasisukseen, liimaamalla. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 305.)

Sandwichelementeillä on erinomaiset lämmöneristys- ja palonsuojausominaisuudet sekä rakenteellinen suorituskyky (Kingspan, Parocpanels). Terästeollisuus onkin pyrkinyt edistämään ohuiden puupinnoitettujen metallilevyjen käyttöä talonrakentamisessa. Lisäksi mekaanisten kiinnittimien sijasta käytettävä levymateriaalin liimaaminen teräsvasoihin näyttää olevan luotettava vaihtoehto. Liimaliitoksen mahdollistama kustannusten säästäminen on huomioitu esimerkiksi teräsrakenteiden suunnittelussa Offshore-teollisuuden kohteissa. Liimaliitokset, jotka omaavat suotuisat väsymisenkestominaisuudet, ovat vakavasti otettava vaihtoehto vielä nykyisin eniten käytetylle liittämismenetelmälle, hitsaukselle. Jotta liimaliitoksen käytölle saataisiin tuotettua onnistuneita sovelluksia, tulisi yleisesti tunnettuja liimaustekniikoita saada sisällytettyä päivittäiseen rakentamiseen. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 305.)

Teräsrakenteiden suunnittelussa, rakennusinsinöörit hyödyntävät suunnittelukoodeja. Koodit sisältävät joukon validointisääntöjä erilaisista sovelluksista sekä kuormitusolosuhteista. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 306.)

Euroopassa teräsrakenteiden suunnittelussa käytettiin ennen Eurokoodia ENV 1993-1-1, mutta se on sittemmin korvattu; nykyisin noudatettavat ohjeet löytyvät niin kutsutun Eurokoodi 3:sen alta löytyvästä SFS-EN 1993-1-1:stä (SFS-EN 1993-1-1, s. 4). Kuitenkaan liimaamista ei sinänsä ole sisällytetty tähän koodiin. Liimaliitosten käytössä tulisi huomioida: käytettävän liiman valinta ja pinnan käsittely, liitoksen rakenne ja rakenteen validointi sekä valmistamisen ja laadun turvaaminen. Näihin liittyy monia ongelmakohtia, jotka suunnittelijoiden tulee huomioida. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 306.)

Liima-aineen valinnassa tietyllä rakenteelle tulee kiinnittää huomiota mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten staattisiin kuormiin, iskukuormituksiin ja väsymiskuormiin. Lisäksi olisi syytä huomioida käyttöiän aikana vaikuttavat ympäristötekijät. Vaadittavan liima-aineen ominaisuudet vaihtelevat suuresti riippuen siitä tulevatko liitokset sisätiloihin vai esimerkiksi Offshore-kohteisiin. Liitoksen suorituskyky riippuu myös paljolti rakenteen geometriasta; liimaliitoksen vaikutusalueella pyritään leikkaaviin kuormitustapauksiin ja veden tunkeutuminen voidaan välttää valitsemalla liitokselle oikeanlainen muoto. Muita suunnittelun aikana huomioitavia asioita ovat valmistuksen vaiheet, jotka liittyvät suoraan liima-aineen vaatimiin prosessiominaisuuksiin kuten viskositeettiin, kovettumisaikaan, käyttöaikaan, kovettumisenaikaiseen paineentarpeeseen sekä sidosaineen sallittuun paksuuteen. Kaikki nämä tulisi ottaa rakennetta optimoitaessa huomioon. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 306–307.)

4.3.1 Rakennusteollisuuden käyttämät liima-aineet

Sandwichelementtien teräspaneelien liimaamisessa käytetään usein kuumaliimaa. Jotta kuumaliima voidaan asentaa, täytyy liima-ainetta kuumentaa, kunnes se on juoksevaa. Jäähdytymisen jälkeen, usein vain muutaman sekunnin kuluttua, liima-aine muuttuu jälleen kiinteäksi ja liimapinnat yhdistyvät. Kuumaliiman ominaisuudet määräytyvät polymeerirakenteen, hartsin, vahan sekä muiden lisäaineiden perusteella. Niin sanotuilla reaktiivisilla, esimerkiksi polyuretaanipohjaisilla, kuumaliimoilla kovettuminen alkaa jäähdytymisen jälkeen. Kuumaliiman etuna on sen asennusnopeus ja haittana puolestaan heikot ominaisuudet virumisen suhteen. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 308.)

Kontaktiliimaa käytetään paneeleissa, kuten esimerkiksi ovissa. Liima-aine tulee levittää kumpaankin liimattavaan pintaan, jotka puolestaan voidaan liittää yhteen noin kymmenen minuutin kuluttua liiman levityksestä. Kontaktiliimaa ei kuitenkaan yleensä käytetä teräsrakenteissa sen huonojen rakenneominaisuuksien vuoksi. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 308.)

Anaerobisen liiman kovettuminen alkaa heti, kun se pääsee kosketuksiin metallin kanssa hapettomassa tilassa (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 308). Hapettomuus merkitsee tässä tapauksessa sitä, että anaerobinen liima ei tartu hyvin lasiin, muoviin tai kumiin

(3M). Huoneenlämmössä liimaliitos on kosketuskuiva puolessa tunnissa ja puolestaan täysin kovettunut 3–24 tunnin kuluttua. Riittävän lujuuden takaamiseksi sidosainepaksuus täytyy rajoittaa 0,05 mm:iin. Anaerobiset liimat omaavat hyvät lujuusominaisuudet, väsymisenkeston ja ne sietävät hyvin kemikaaleja. Ominaisuuksiensa takia anaerobisia liimoja käytetään pienempiin metalliosiin kuten pulttien lukitukseen. Rakentamisessa anaerobisten liimojen käyttö on hyvin harvinaista. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 308.)

Akryyliliimat ovat kaksikomponenttiliimoja, missä liiman sisältämä A-osa levitetään toiseen liimapintaan ja B-osa toiseen. Kovettumisreaktio käynnistyy osien yhdistämisen jälkeen. Toisin kuin epokseilla ja polyuretaaniliimoilla, prosessin alullepaneva ja kiihdyttävä aine ei reagoi hartsin kanssa. Akryyliliiman kovettumisaika on vain muutamia sekunteja ja vain muutaman minuutin päästä liiman levityksestä sekä osien yhdistämisestä saavutetaan lopullinen lujuus. Akryyliliimoja voi käyttää teräksille, mutta sen ominaisuudet heikentyvät pitkäaikaisen staattisen kuormituksen ja kosteuden vaikutuksesta. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 308.)

Syanoakrylaatti eli tutummin pikaliima, kovettuu myös muutamassa sekunnissa ja luo vahvan liitoksen. Kovettumisprosessi käynnistyy kosteuden vaikutuksesta. Syanoakrylaatilla on kaksi merkittävää haittapuolta teräsrakentamisessa; se käyttäytyy hauraasti ja sillä on lyhyt käsittelyaika. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 308–309.)

Epoksiliimojen kovettuminen tapahtuu yhdessä hartsin ja kovetteen reagoidessa. Yksikomponenttiliiman tapauksessa molemmat osat tulee sekoittaa ja kovettaa yli 120 °C:een lämpötilassa. Kaksikomponenttiliimat puolestaan sekoitetaan määrättyssä suhteessa ja kovettuminen tapahtuu huoneenlämmössä tai vain hieman sitä suuremmissa lämpötiloissa, kuten esimerkiksi 50 °C:ssa. Hauraan käyttäytymisen ehkäisemiseksi useimmat nykyään saatavilla olevista epokseista lujitetaan käyttämällä lisäaineita. Epoksiliimojen suurempien lujuusominaisuuksien vuoksi, ne soveltuvat käytettäviksi teräsrakenteissa. Käyttökohteena epoksiliimoille voisi mainita esimerkiksi teräslevyjen liimaamisen betonirakenteisiin lujuuden parantamista varten. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 309.)

Polyuretaaniliimoista on myös saatavilla yksi- ja kaksikomponenttiversioita. Yksikomponenttiliimat kovettuvat ilmankosteuden vaikutuksesta ja niiden lujuusominaisuudet ovat matalia. Alankomaissa yksikomponenttiset polyuretaaniliimat ovat yleisiä sandwichelementtien teräspaneelien kiinnityksessä. Kaksikomponenttipolyuretaaniliimat tulee sekoittaa määrättyssä suhteessa ja normaalisti niiden kovettumisaika vaihtelee yhdestä kahdeksaan tuntiin. Lopullisen lujuuden saavuttamiseen menee noin viikko. Lisäaineiden valinnalla voidaan vaikuttaa lujuuteen, liiman tarttuvuuteen, kovuuteen, lämmönkestoon sekä kovettumisaikaan. Ominaisuuksiensa puolesta polyuretaaniliimat soveltuvat käyttöön teräsrakenteissa. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 309.)

MS-polymeeriliima eli *Modifioitu Silaani*, käyttäytyy kuten tiivistysaine; sen lujuusominaisuudet ovat suhteellisen heikot ja suuret muodonmuutokset ovat myös mahdollisia. MS-polymeeriliimoja käytettäessä on sidosainepaksuuden oltava usein muutamaa millimetriä paksumpi. MS-polymeeriliima on yksikomponenttisysteemi, joka kovettuu ilmankosteuden vaikutuksesta ja se saavuttaa lopullisen lujuutensa viikon kuluttua liimauksesta. Rakentamisessa rakenneominaisuuksia omaavat lasit, kuten julkisivujen suuret lasiseinämät, ovat hyvä esimerkki MS-polymeerien käyttökohteesta. Toisaalta on myös havaittu, että MS-polymeerien sovellukset voidaan myös korvata muilla samankaltaisilla joustavilla liima-aineilla kuten polyuretaanilla. (Van Straalen & Van Tooren 2005, s. 309.)

4.4 Vene- ja meriteollisuus

Liimaliitokset ovat saavuttaneet suosiotaan myös merisovelluksissa, jossa liimaliitokselle on asetettu useita eri vaatimuksia. Liitokset saattavat olla rakenteen kannalta kriittisiä tai sitten liiman käyttöön liitoksessa voi olla pääsyynä vain liimalle tyypillinen tiivistävä ominaisuus; usein liitoksesta on hankala sanoa, kumpaan luokkaan se kuuluu varsinkin pultattujen liimaliitosten tapauksessa. Tyypillisesti liitettävien pintojen ala on suuri ja ympäristöolosuhteet melko vaativat. Laivojen ja veneiden käyttöikä on normaalisti useita vuosikymmeniä ja rakenteelliset virheet ovat myös mahdollisesti kriittisiä yleisen turvallisuuden kannalta. Robustin rakenteen säilyvyys sekä liitosten vikaturvallinen käyttäytyminen on siten välttämätöntä. (Hentinen 2005, s. 386–387.)

Jotkin veneiden raskaasti kuormitetut osat kuten rustiraudat tai peräsimen laakerit saattavat olla liitettynä runkoon tai laipioon liimaamalla. Hyvä laadunvalvonta ja muotoilu on välttämätöntä pitkäaikaisen kestävyuden takaamiseksi. Lisänä mainituissa kriittisissä liitoksissa käytetään usein kuitenkin jonkinlaisia mekaanisia kiinnittimiä. Esimerkiksi kölin painolastit on pultattu tiukasti purjeveneiden runkoon ja liitos on tiivistetty tyypillisesti polyesteri- tai epoksikitillä. Kuitenkin kölin pultit on mitoitettu kantamaan yksinään köliin kohdistuvat kuormat äärimmäisessä tapauksessa, jahdin kaatuessa. (Hentinen 2005, s. 388.)

Lujitemuovien, *Fibre Reinforced Plastics*, eli FRP-rakenteiden liittäminen metallirunkoihin on yleistä suuremmissa laivoissa. Näistä tehtyjen sandwichelementtien tuoma säästö painossa voi osoittautua elintärkeäksi; etenkin ylempänä sijaitsevilla kansissa. FRP-rakenteet ovat yleisiä merisovelluksissa ja liitokset ovat samankaltaisia, kuten sandwichelementeillä yleisestikin; sandwichelementtien liittämistä käsiteltiin jo kappaleessa 4.3. Kun FRP-osa yhdistetään teräkseen, niiden välinen liitos on usein pultattu. Suurten osien liittämisessä pulttiliitokset eivät enää kuitenkaan osoittaudu kovinkaan kustannustehokkaaksi liittämistavaksi. Tällöin liimaaminen nousee kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi huolimatta siitä, että telakka ei normaalisti ole kovinkaan sopiva ympäristö liimaliitokselle sen puhtaus-, lämpötila- ja kosteusvaatimusten vuoksi. Lisäksi liimatessa liitoksen staattinen lujuus kasvaa selvästi. Toinen vaihtoehto FRP-rakenteiden liittämiseen on sellainen, että FRP-sandwichelementteihin on liimattu valmistajan toimesta valmiit kiinnityselementit, joiden avulla FRP-rakenne pystytään telakalla hitsaamaan laivaan aivan kuten vastaavat metalliosatkin. (Hentinen 2005, s. 388–389.)

Kuormien määrittäminen on olennainen osa liimaliitoksen suunnittelua. Merisovelluksissa, kuormat tai kuormitusyhdistelmät on usein jaettu lokaaleihin ja globaaleihin kuormituksiin. Lokaalit kuormitukset vaikuttavat suoraan rakenteen rajattuun alaan, kun taas puolestaan globaalit kuormat johtuvat runkopalkin taivutuksesta, kiertymisestä tai leikkaamisesta monirunkoisten alusten tapauksessa. Lokaalit kuormitukset saattavat normaalisti olla hallitsevia, kun tarkastellaan vain yhtä paneelia, mutta globaalien kuormien vaikutus korostuu purjeveneiden ja suurten laivojen tapauksessa. (Hentinen 2005, s. 390.)

Sovelluksesta riippuen, liitokselle kohdistuvia vaatimuksia voi Hentinen (2005, s. 393) mukaan olla myös:

1. Lämmöneristävyys; FRP-sandwichpaneeli on tehokas eriste ja tätä ominaisuutta saatetaan vaatia myös liitoksessa.
2. Korroosionkesto; matalat huoltokulut ovat yksi syy FRP-rakenteiden käyttöön laivoissa, ja liitoksen tulisi noudattaa samaa linjaa.
3. Pinnoitus; samanlaisten pinnoitteiden, kuin mitä käytetään metallirakenteissa tai FRP-paneeleissa, tulisi myös sopia itse liitokseen.
4. Purkamisen; vaurioituneen paneelin vaihdon tulisi olla mahdollista. Mikäli metalliprofiili on helposti saavutettavissa, liitos voidaan purkaa leikkaamalla profiili.

Liima-aineen ominaisuuksille kohdistuvat vaatimukset vene- ja meriteollisuudessa ovat: kosteuden-, lämmön- ja UV-säteilynkestävyys, toleranssi liitoksen paksuuden eri variaatioille, lujuus ja jäykkyys sekä levittämisen helppous suuriin rakenteisiin. Kosteuden kesto on meriteollisuudensovelluksissa yksi hallitsevista tekijöistä sopivan liima-aineen valinnassa. Liitoksen veteen uppoamisen oletetaan olevan vain vedenalaisissa osissa kuten pilsseissä ja säiliöissä, mutta kosteus on usein korkea kaikkialla; roiskeita ja valumia esiintyy myös ylemmillä kansilla. Onneksi kuitenkin monet liima-aineet kykenevät kestäämään kosteutta ja soveltuvat täten meriteollisuuden tarpeisiin. Liiman heikkeneminen liitoksessa veden tunkeutumisen seurauksena on yleensä kriittisin tekijä. Veden tunkeutumiselle liitokseen voi olla useita syitä: liima-aine voi olla levitetty kostealle pinnalle tai vesi diffundoituu kovettuneen liima lävitse tai vesi tunkeutuu liitokseen rajakerroksen huokoisen liima-alustan taikka halkeamien kautta. (Hentinen 2005, s. 393–394.)

Laivarakenteiden lämpötila vaihtelee tyypillisesti -30 °C ja +30 °C välillä, mutta ylemmillä kansilla auringon vaikutuksesta lämpötila voi nousta tummilla FRP-pinnoilla jopa +60 °C:seen. Tällaiset olosuhteet täytyy huomioida etenkin, mikäli lämpölaajeneminen eri materiaalien välillä on suuri. Lisäksi, mikäli käytetään edellä mainittuja ”hitsattavia” FRP-sandwichpaneeleita, lämpötila voi nousta hitsattaessa

huomattavan suureksi liitoksen alueella; hitsaus ei siis saa aiheuttaa vahinkoa rakenteeseen. (Hentinen 2005, s. 394.)

Auringon UV-säteilyä vastaan vaadittu suoja muuttuu relevantiksi kaikkialla kansien sekä varalaitojen alueella; tyypillisesti polyuretaani- ja epoksiliimat täytyy suojata suoralta auringon säteilyltä. Tyypillisessä veneenrakennuksessa, monet liitokset on joka tapauksessa, huolimatta UV-säteilyn määrästä, suojattu ulkonäön perusteella. Hyvinä esimerkkeinä tästä ovat rungon ja kannen liitokset, jotka on peitetty kumilla tai alumiiniprofiileilla. Ikkunoiden sekä muiden läpinäkyvien kohteiden liitokset on ongelmallista suojata auringon säteilyä vastaan, ja niiden suojaaminen on jopa tärkeämpää kuin autoissa tai muissa tieajoneuvoissa. UV-suojan tärkeyden korostuminen johtuu pääasiassa siitä, että vesi heijastaa UV-säteilyä ja merellä tai satamassa ei esiinny säteilyltä estävää varjoaluetta tai suojaa. Tehokkain tapa suojata liitos säteilyltä, on käyttää siinä keraamista silkkipainettua reunaa, joka vähentää valon läpäisykyvyn 0,1 %:iin tai jopa pienempään lukemaan. Suojaverhous, läpinäkymättömät maalit tai mustat pohjamaalit ovat myös vaihtoehtoja liitoksen suojaamiseen UV-säteilyltä. (Hentinen 2005, s. 394–395.)

Sekä muoto- että paksuustoleransseissa on vaikea pysyä, kun liitettävä pinta on laaja ja erityisesti vielä, mikäli kyseessä on vielä FRP-rakenne. Liitoksen liima-ainepaksuus saattaa vaihdella jopa 10–15 mm. Liiman tulisi pystyä täyttämään liimattavien pintojen välinen tila, eivätkä sidosominaisuudet saisi muuttua paksuuden muuttuessa. Joustavan polyuretaaniliiman ominaisuudet ovat yleensä tällaisia liitoksen paksuudesta riippumattomia. Paksujen liitosten johdosta, liima-ainetta voi lisäksi kulua paljon liitokseen, minkä vuoksi liima-aineen materiaalihinta on tärkeä ottaa huomioon. (Hentinen 2005, s. 395.)

Liima-aineen lujuus ei välttämättä sinällään ole kovin kriittinen tekijä vene- ja meriteollisuudessa, sillä liitoksen geometriaa ja pinta-alaa muuttamalla voidaan lisätä liitoksen kuormankantokykyä. Toisaalta realistisen lujuusarvon selvittäminen mitoitus- varten voi osoittautua ongelmaksi; liima-aineen nimellislujuus on herkkä kuorman tyypille, ympäristötekijöille, tuotantoparametreille jne. Liima-aineen jäykkyyden ja tarpeellisen liitoksen jäykkyyden arviointi tulee suorittaa harkiten. Itseasiassa, vain osa

meriteollisuuden sovellutuksista vaatii erittäin korkeaa jäykkyyttä liima-aineelta. Usein tietty määrä joustavuutta on hyödyllistä ja lisäksi pienen jäykkyyden omaava liitos on sidoksissa hyvään värinänvaimennuskykyyn. (Hentinen 2005, s. 397.)

Suurten osien valmistaminen asettaa vaatimuksia liima-aineen käyttöajalle. Riippuen liiman levittämiseen käytetystä menetelmästä ja liimattavan pinnan asettelusta, vaadittu käyttöaika vaihtelee merkittävästi. Kehysten, pohjan jäykisteiden tai sisäpintojen kiinnittämisessä, vaadittu käyttöaika on noin 30 minuuttia. Rungon ja kannen välisissä liitoksissa, vaadittu käyttöaika on normaalia pidempi ja voimakkaasti riippuvainen rungon koosta. Vaatimus lyhyelle käyttöajalle korostuu eniten tyypillisessä veneiden sarjatuotannossa; niiden tuotantomenetelmät eivät kuitenkaan sisällä kovettumista korotetuissa lämpötiloissa. Sen sijaan korkeamman suorituskyvyn omaavien jahtien ja veneiden rungot ja kannet kovetetaan usein 40 ± 70 °C:ssa. Liima-aineen viskositeetin tulisi sallia liiman levittäminen myös pystysuorille pinnoille. Tahnamaisia liima-aineita käytetään yleensä, mikäli rako liimapintojen välillä on suuri; liimakerroksen tulee olla riittävän paksu aukon täyttämiseksi, mikäli lämpötila pysyy hyväksyttävissä lukemissa. (Hentinen 2005, s. 397.)

5 YHTEENVETO

Vaikka liimat ovat ennen tuottaneet suhteellisen heikkoja liitoksia, liimaliitosten lujuus on nykyään lähellä jopa itse liitettävien materiaalien lujuutta. Lisäksi liimat ovat korvanneet muita liittämismenetelmiä eri sovelluksissa. Liimaaminen tarjoaa tasaisen jännitysjakauman liitoksessa, liimaliitokset ovat halvempia ja kevyempiä sekä omaavat ylivoimaisen värähtely- ja vaimennuskyvyn. Liimaliitoksella saavutetaan lisäksi sileä ja tiivis, sähköä eristävä sekä korroosiota estävä, jäykkä liitos. Lisäksi liimaamisella on kyky liittää erilaisia materiaaleja yhteen. Ongelmina liimaliitoksella puolestaan on: sen hankala purettavuus, vaatimukset esikäsittelylle, testausmenetelmien puute sekä liima-aineen herkkyys pilaantua eri tavoin. Lujan liitoksen saavuttamiseksi on tärkeä saada liitos sellaiseksi, että siihen kohdistuu vain leikkaavia voimia.

Oikeaoppisen liimaliitoksen saavuttamiseksi tulee kiinnittää huomiota: liima-aineen hankkimiseen ja säilöntään, liimattavien osien pitämiseen yhdessä, toleransseihin, osien esikäsittelyyn, liima-aineen sekoitukseen/valmistamiseen, liima-aineen levittämiseen, osien ja liima-aineen yhdistämiseen, voiman käyttöön liitoksen paikalla pysymisen tai kovettamistarkoituksen vuoksi liimauksen aikana sekä liitetyn kokoonpanon tarkasteluun. Näistä tärkein on esikäsittely, joka voidaan hoitaa mekaanisesti ja/tai kemiallisesti. Esikäsittelyllä pyritään puhdistamaan pinta, saada liimattava pinta-ala mahdollisimman suureksi karhentamalla pintaa sekä saada pinnan kemiasta sellainen, että liima-aineella on optimaaliset tarttuvuusominaisuudet.

Liimoja hyödynnetään teräsrakenteissa mm. auto-, lento-, rakennus-, vene- ja meriteollisuudessa. Näistä liimaamisen ominaisuuksista hyödynnetään kykyä liittää erilaisia materiaaleja keskenään, kykyä tiivistää liitosta ja parantaa ääneneristystä, värinäominaisuuksia sekä rakenteen jäykkyyttä lisäävää ominaisuutta. Liimoja käytetään paikoissa, missä muiden liittämismenetelmien ongelmat korostuvat.

LÄHDELUETTELO

3M. United States, Manufacturing, Bonding and Assembly, Structural Adhesives, Anaerobic Adhesives [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.3m.com/3M/en_US/bonding-and-assembly-us/structural-adhesives/anaerobic-adhesives/ [viitattu 30.3.2021].

3M. Suomi, Tuotantoteollisuus, Liimat ja teipit, Koulutus, Liittämisen teknologia, Teipeissä käytettävät paineherkät liima-aineet eli PSA-liimat (Pressure Sensitive Adhesives) [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.3msuomi.fi/3M/fi_FI/bonding-and-assembly-ndc/training-education/science-of-adhesion/common-chemistry-psa-tapes/ [viitattu 30.3.2021].

Campbell F.C., 2010. Structural composite materials. Materials Park, Ohio: ASM International, 621 s. ISBN 1-61344-124-X [verkkodokumentti].

Campbell F.C., 2011. Joining: understanding the basics. Materials Park, Ohio: ASM International, 346 s. ISBN 1-61503-848-5 [verkkodokumentti].

Davies G., 2012. Materials for automobile bodies. 2 painos. Amsterdam; Boston: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 417 s. ISBN 1-283-73493-1 [verkkodokumentti].

Dunn D.J., 2010. Update on engineering and structural adhesives. Shawbury, U.K.: iSmithers, 198 s. ISBN 1-62870-310-5 [verkkodokumentti].

Ebnesajjad S. & Ebnesajjad C.F., 2014. Surface treatment of materials for adhesive bonding. 2 painos. Amsterdam: Elsevier/William Andrew, 360 s. ISBN 0-323-26504-9 [verkkodokumentti].

Hentinen M., 2005. 17 – Boats and marine. Teoksessa: Adams R.D. (toim.) Adhesive bonding: Science, technology and applications. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, S. 386–416. ISBN 1-62870-366-0 [verkkodokumentti].

Kingspan. Eristetyt paneelit, seinäelementit, KS1000 AT piilokiinnityselementti [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.kingspan.com/fi/fi-fi/tuotteet/eristetyt-paneelit/seinaelementit/ks1000-at-piilokiinnityselementti> [viitattu 30.3.2021].

Parocpanels. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.parocpanels.com/fi-fi> [viitattu 30.3.2021].

Pocius A.V. & Dillard D.A., 2002. The mechanics of adhesion. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2020 s. ISBN 1-281-04864-X [verkkodokumentti].

SFS-EN 1993, 2006. Teräsrakenteiden suunnittelu. Suomen standardoimisliitto SFS: 99 + 17 s. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://online-sfs-fi.pc124152.oulu.fi:9443/fi/index/tuoteryhmahaku.html.stx?pg=92.093&g=SFS> [viitattu 4.4.2021].

Van Straalen I.J.J. & Van Tooren M.J.L., 2005. 14 - Building and construction – steel and aluminium. Teoksessa: Adams R.D. (toim.) Adhesive bonding: Science, technology and applications. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, S. 305–327. ISBN 1-62870-366-0 [verkkodokumentti].